

Duurzame energie dichterbij met nanotechnologie¹

Essay over de (on)mogelijkheden van nanotechnologie voor een duurzame energievoorziening.

Joost van Kasteren

Ontwikkelingen in nanotechnologie maken het mogelijk om processen als het omzetten van zonlicht in elektriciteit of aardgas en steenkool in dieselolie op moleculair niveau te volgen en te sturen. Dat biedt mogelijkheden om deze processen efficiënter te maken. Manipulatie op moleculaire schaal biedt bovendien perspectieven voor een veilige productie, opslag en gebruik van waterstof.

Inleiding

Energie is voor de samenleving wat zuurstof is voor het lichaam. Zelfs als de stroom maar even uitvalt, leidt dat in geïndustrialiseerde landen tot (meer of minder ernstige) maatschappelijke ontwrichting. De behoefte aan energie stijgt nog steeds. Momenteel bedraagt die circa 14 miljard kilowatt per dag, hetgeen overeenkomt met 200 miljoen vaten olie. Die hoeveelheid wordt grotendeels geconsumeerd door één miljard mensen in de geïndustrialiseerde wereld. Als de andere vijf miljard mensen maar een beetje meer energie gaan gebruiken, dan betekent dat dat de energieproductie op zijn minst moet verdubbelen. In de Verenigde Staten spreekt men in dit verband over de ‘Terawatt uitdaging’, een verhoging van de energieproductie van veertien naar dertig terawatt (een terawatt is een miljard kilowatt).

Om aan de groeiende behoefte tegemoet te komen, is het niet genoeg om meer olie, gas en steenkool uit de grond te halen of meer nucleaire installaties te bouwen. Zowel de uitputting van grondstoffen als de milieugevolgen van zo’n aanpak dwingen tot het ontwikkelen van alternatieven. Op basis van bestaande ontwikkelingen kunnen we drie streefbeelden onderscheiden voor een duurzamere energievoorziening, waarbij nanotechnologie een cruciale rol kan spelen.

De eerste ontwikkeling betreft de zogenaamde ‘voorraadbronnen’: gas, olie, steenkool, biomassa en kernenergie. De nadruk daarbij ligt op ‘schone’ omzetting (conversie), dat wil zeggen geen emissies van stikstof- en zwaveloxiden en een drastische vermindering van de uitstoot van kooldioxide. Bij de schone en veilige conversie van bijvoorbeeld olie, gas en steenkool wordt gebruik gemaakt van katalysatoren. Ook de brandstofcel maakt daar deel van uit. Nanotechnologie kan worden ingezet om katalyseprocessen te verbeteren.

Een tweede ontwikkeling is de geleidelijke groei van het aandeel van vernieuwbare energiebronnen - zoals de zon, de wind, golven en de getijden – in de

¹ Dit essay, geschreven in opdracht van het Rathenau Instituut, verkent de mogelijkheden die nanotechnologie kan hebben voor de energievoorziening. Het is gebaseerd op interviews met een tiental Nederlandse onderzoekers en adviseurs wier deskundigheid uiteen loopt van katalyse tot netwerken en van steenkool tot zonne-energie.

energievoorziening. Kenmerkend voor deze ‘stromingsbronnen’ is dat de hoeveelheid elektriciteit die ze leveren fluctueert. Het gerelateerde streefbeeld heeft betrekking op het efficiënter benutten van stromingsbronnen, meer in het bijzonder van zonne-energie. Daarvan valt dagelijks meer dan 165.000 terawatt op het aardoppervlak. Zelfs als we daar een klein deel van te pakken zouden kunnen krijgen, kunnen we alweer een heel eind vooruit. Nanotechnologie speelt een cruciale rol bij het efficiënter maken van de omzetting van licht in elektriciteit.

Ten slotte is er een sterke tendens tot decentralisatie van de elektriciteitsvoorziening. Daarvoor zijn zowel technische (toename stromingsbronnen) als maatschappelijke (vermindering van de kwetsbaarheid) oorzaken voor aan te wijzen. Het groeiende aantal windturbines, warmtekrachtcentrales en zonnepanelen zal ongetwijfeld gevolgen hebben voor de manier waarop elektriciteit wordt gedistribueerd. De afgelopen honderd jaar lag daarbij de nadruk op centralisatie: steeds grotere centrales die steeds verder van de afnemer verwijderd zijn. Tegelijkertijd ontwikkelden elektriciteitsbedrijven zich van gemeentelijke diensten tot wereldwijd opererende multinationale ondernemingen.

Nieuwe ontwikkelingen zoals de micro-gasmotor, de brandstofcel (vast en mobiel) en de foto-voltaïsche zonnecel maken het mogelijk dat elke gebruiker voortaan ook elektriciteit kan produceren. In combinatie met de liberalisering van de elektriciteitsmarkt vormt dat een flinke stimulans voor decentrale opwekking en lokale distributie. Nanotechnologie en dan vooral de ontwikkeling van sensoren, maakt het mogelijk om een betrouwbaar Energienet te realiseren op basis van verregaand gedecentraliseerd opgesteld vermogen (elk huis zijn eigen centrale).

Hoe de toekomstige energievoorziening er uiteindelijk uit zal zien is verborgen in de schoot der goden, maar duidelijk is wel dat nanotechnologie in vrijwel alle genoemde ontwikkelingen een belangrijke rol speelt. Die rol is vooral *enabling*. Het volgen en sturen van processen op moleculaire schaal maakt betere katalysatoren mogelijk voor schone conversie van voorraadbronnen, maar ook goedkopere zonnecellen en verbeterde technieken voor opslag van elektriciteit en waterstof.

Schone conversie

Om te beginnen speelt nanotechnologie een rol bij ‘schone’ energieconversie. Een voorbeeld daarvan is de omzetting van aardgas in vloeibare brand- en grondstoffen. Aardgas komt in grote hoeveelheden voor, maar meestal op plaatsen ver van eventuele gebruikers. Een van de mogelijkheden is koelen tot LNG, *liquid natural gas*, maar dat is kostbaar, terwijl het proces zelf en het transport van vloeibaar aardgas nogal wat risico’s opleveren. Een beter alternatief is om aardgas ter plekke om te zetten in andere producten, zoals kunstmest of vloeibare brand- en grondstoffen. Een van de processen voor het omzetten van aardgas is SMDS, een afkorting die staat voor *Shell Middle Distillate Synthesis*. Daarbij wordt gas in een aantal stappen omgezet in kerosine, diesel, LPG en producten zoals oplosmiddelen en verschillende soorten was. Bij die omzettingen wordt veelvuldig gebruik gemaakt van katalysatoren, stoffen die in kleine hoeveelheden chemische omzettingen gemakkelijker en sneller doen verlopen zonder daarbij zelf gebruikt te worden. SMDS wordt op grote schaal toegepast in een fabriek van Shell in Maleisië.

Ook elders in de wereld (Nigeria, Katar) worden momenteel fabrieken gebouwd om aardgas dat nu nog ter plekke wordt verbrand (afgefakkeld) grootschalig om te zetten in dieselolie. Het voordeel van deze dieselolie is dat ze 'superschoon' is en vrijwel geen zwaveloxiden en roet uitstoot en veel minder stikstofoxiden. Het proces wordt gekatalyseerd door kobalt, een metaal dat beperkt beschikbaar en daardoor erg kostbaar is.

In de meeste gevallen is het maken van katalysatoren een zaak van *trial and error*, een kwestie van uitproberen dus. Bij het ontwikkelen van katalysatoren voor het SMDS-proces is echter voor het eerst gebruik gemaakt van technieken die oorspronkelijk door IBM zijn ontwikkeld en die het mogelijk maken om op nanoschaal te 'zien' hoe moleculen worden gekoppeld en ontkoppeld aan het oppervlak van de katalysator. Die technieken zijn inmiddels fors verbeterd. Zo heeft de Universiteit Utrecht een elektronenmicroscopie ontwikkeld, waarmee je driedimensionale structuren kunt waarnemen die slechts twee tot drie nanometer groot zijn. Met een dergelijke microscoop is het mogelijk processen op moleculaire schaal te volgen.

Nanotechnologie wordt in eerste instantie gebruikt om het oppervlak van de katalysatordeeltjes fors te vergroten, waardoor veel minder katalysator nodig is voor een zelfde hoeveelheid diesel. Daarnaast wordt nanotechnologie gebruikt om kobaltdeeltjes heel gericht aan te brengen op een – goedkoper – dragermateriaal. Bij de groep van Krijn de Jong in Utrecht is een drager ontwikkeld die een honingraatstructuur heeft met kanaaltjes van drie nanometer, waarin het kobaltatoom gedeponereerd kan worden. Daardoor wordt de katalysator efficiënter gebruikt, zodat er minder van nodig is.

In principe kan nanotechnologie ook worden gebruikt om de bestaande processen voor het vergassen en vloeibaar maken van steenkool efficiënter te maken. Dat gebeurt onder andere bij het bedrijf Hydrocarbon Technology dat samen met het Chinese steenkoolbedrijf Shenhua een fabriek bouwt. Het nadeel van steenkool ten opzichte van aardgas is echter dat steenkool per opgeslagen eenheid energie veel meer kooldioxide (CO₂) bevat. Dat geldt ook voor de vloeibare brandstoffen die van steenkool worden gemaakt. Kooldioxide is thermodynamisch zeer stabiel; het kost dan ook veel energie om de binding tussen koolstof en zuurstof te verbreken. Opslaan is een optie, maar is energetisch niet erg voordelig.

Het zou dan ook beter zijn om de steenkool in de grond te laten zitten, ware het niet dat de energiehonger van de Verenigde Staten en China zo groot is dat het aanspreken van de steenkoolvoorraden ter plaatse wel erg verleidelijk wordt. Om de schade te beperken staan grosso modo twee wegen open. Een is het vergassen van steenkool en het vooraf afscheiden van kooldioxide. De tweede is het afscheiden van kooldioxide uit de rookgassen.

De eerste methode is gemakkelijker dan het tweede, maar vereist wel een compleet nieuwe centrale die meer weg heeft van een chemische fabriek dan van een normale elektriciteitscentrale. Nanotechnologie zou hier een bijdrage kunnen leveren in de vorm van efficiëntere katalysatoren voor vergassing. Het scheiden van de rookgassen, de tweede optie, kan in principe in een nageschakelde installatie op bestaande centrales. De bijdrage van nanotechnologie zou in dit geval een selectief absorberend

membraan kunnen zijn dat kooldioxide wegvangt.

Brandstofcel

Het gebruik van nanowetenschap en -technologie voor het verbeteren van katalysatoren werpt ook zijn vruchten af bij het efficiënter en goedkoper maken van brandstofcellen. Kort door de bocht geformuleerd is een brandstofcel een accu waarin waterstof met zuurstof reageert onder de vorming van schoon water en elektriciteit. Chemische energie wordt dus rechtstreeks omgezet in elektriciteit, zonder gebruik te maken van bewegende delen, zoals in een sneldraaiende gasturbine. Het wezenlijke verschil met een accu is echter dat je een accu moet 'opladen' met elektriciteit, terwijl een brandstofcel continu van brandstof (waterstof) wordt voorzien. In de brandstofcel stimuleert een katalysator aan de anode (de positieve pool) het waterstofmolecuul om een elektron af te geven. Het positieve ion beweegt zich door een elektrolyt naar de kathode (de negatieve pool). Het elektron stroomt via een draadje buitenom en levert daarmee stroom aan een computer, een auto of een compleet flatgebouw.

Brandstofcellen zijn er in verschillende varianten. Een van de meer bekende is de PEM-cel, waarbij PEM staat voor *Proton-Exchange Membrane*. Deze cel maakt gebruik van waterstof, al dan niet via een omvormer gemaakt uit aardgas, en geldt als een interessant, zij het nogal duur alternatief voor de benzine- of dieselmotor in het vervoer. Op dit moment worden er praktijkproeven gedaan met personenwagens en bussen, aangedreven door elektrische energie uit een brandstofcel. Andere types zoals de MCFC (*Molten Carbonate Fuel Cell*) en de SOFC (*Solid Oxide Fuel Cell*) worden nu al gebruikt voor stationaire toepassingen, zoals het opwekken van warmte en elektriciteit in flatgebouwen en ziekenhuizen. Een voorbeeld is het beroemde Condé Nast Building in New York dat van warmte en elektriciteit wordt voorzien door een brandstofcel. Qua investeringskosten komen stationaire brandstofcellen in de buurt van die van een steenkoolcentrale (duizend dollar per kilowatt). Grootschalige toepassing blijft vooralsnog uit vanwege de hoge prijs van aardgas (gekoppeld aan de olieprijs) en de lage prijs van elektriciteit. Brandstofcellen voor mobiel gebruik worden inmiddels beproefd door een aantal automobielproducenten.

Nanowetenschap en -technologie hebben er toe geleid dat de elektriciteitsproductie per milligram katalysator in de brandstofcel flink is verbeterd. Enerzijds als gevolg van het oppervlakte-effect (hoe kleiner de deeltjes, hoe groter naar verhouding hun oppervlak), anderzijds doordat men beter in staat is om de omzettingen aan het oppervlak te volgen en te sturen. Nog geen tien jaar geleden was er een hoeveelheid platina ter waarde van dertigduizend euro nodig voor een PEM-brandstofcel; nu is dat een factor honderd minder en nog steeds dalend.

Zonnecel

Naast de betekenis voor het benutten van voorraadbronnen is nanotechnologie ook van belang voor het benutten van stromingsbronnen, meer in het bijzonder van zonne-energie. De hoeveelheid energie van de zon is meer dan tienduizend maal de hoeveelheid die jaarlijks wereldwijd wordt gebruikt. Daar ligt een enorm potentieel, dat niet onopgemerkt is gebleven. Zo streeft de Nederlandse regering er naar om in 2020 een kleine twintig procent van de totale hoeveelheid elektriciteit uit stromingsbronnen en biomassa te halen. Dat klinkt weliswaar bescheiden, maar in

2000 voorzag duurzame energie nog slechts in één procent van de elektriciteitsconsumptie.

Een essentieel probleem bij de omzetting van zonlicht in elektriciteit (foto-voltaïsche zonne-energie) zijn de kosten per kilowattuur. Bij de huidige generatie zonnecellen liggen die rond de vijftig eurocent en dat is een veelvoud van een kilowattuur gemaakt met behulp van kernenergie, aardgas of zelfs windturbines. Willen de ambities worden gerealiseerd dan zal de prijs per kilowattuur zonne-energie dus drastisch moeten dalen, laten we zeggen tot een tiende van de huidige prijs. Aangezien de kosten per kilowattuur voornamelijk worden veroorzaakt door de prijs van zonnecellen, zullen deze een stuk goedkoper moeten worden. Nanowetenschap en nanotechnologie spelen daarbij een belangrijke rol.

De huidige generatie zonnecellen bestaat uit silicium en heeft een rendement dat varieert van 12 tot 18 procent. Silicium is een halfgeleider, wat wil zeggen dat het – in vergelijking met goed geleidende metalen – maar weinig beweeglijke elektronen heeft. Onder invloed van zonlicht kan er echter een elektron worden vrijgemaakt, dat zich kan verplaatsen. Als gevolg daarvan blijft er een eveneens beweeglijke lege plaats over, een ‘gat’. De kunst is om het elektron dat de energie van het zonlicht in zich draagt, uit het silicium te krijgen, voordat het zich weer met het ‘gat’ verbindt. Dat gebeurt door silicium licht te verontreinigen met fosfor of borium (doperen). Het elektrisch veld dat daardoor ontstaat trekt elektron en ‘gat’ uit elkaar. Pas als de stroomkring wordt gesloten, bijvoorbeeld door het aansluiten van een lamp, komen de elektronen buitenom weer bij het ‘gat’.

Een jaar of tien geleden ontwikkelde de in Zwitserland werkzame chemicus Michael Grätzel een nieuwe, veel goedkopere techniek voor het maken van zonnecellen. Daarbij maakte hij gebruik van titaandioxide (titania) dat hij in een dunne laag aanbracht op een glasplaat. Titaandioxide is een goedkope kleurstof die onder meer wordt gebruikt in muurverf, tandpasta en zonnebrandolie. Het poreuze titania wordt gedrenkt in een kleurstof. Valt er vervolgens zonlicht op de kleurstof dan worden elektronen uit hun baan geschoten en weggevangen. Zij leveren de elektriciteit die nodig is om lampen te laten branden en vaatwassers te laten draaien.

De omzetting die in de Grätzelcel plaatsvindt heeft veel weg van een katalytische reactie. Het poreuze titaniumoxide met daarop de kleurstof, die de elektronen produceert, fungeert daarbij als katalysator voor het omzetten van een foton zonlicht in elektriciteit. Waar de siliciumzonnecel nog behoort tot het terrein van de fysici, heeft de Grätzelcel de aandacht getrokken van chemici. Zij zien mogelijkheden om het principe te gebruiken om op grote schaal materialen te produceren die zonlicht omzetten in elektriciteit.

Essentieel, ook voor de Grätzelcel, is dat de elektronen, nadat ze door lamp of vaatwasser zijn gegaan, weer naar de kleurstof worden geleid voor een volgende ronde. In de Grätzelcel wordt daarvoor gebruik gemaakt van een vloeistof. Dat is lastig, zeker bij zonnecellen die als verf op daken en wanden wordt aangebracht. De groep van Joop Schoonman in Delft werkt daarom aan een cel waaraan geen vloeistof meer te pas komt, de Delftzonnecel. In plaats van een vloeistof wordt gebruik gemaakt van een laagje koperindiumdisulfide (een vaste stof), dat in de microscopisch kleine poriën van titaniumoxide wordt aangebracht.

Onlangs is de groep er in geslaagd om een vaste-stof-zonnecel te maken met een rendement van vier procent. Door aanpassing van het ontwerp en het productieproces denkt men binnen een jaar een rendement van acht procent te kunnen halen. In verhouding tot de beste (en duurste) zonnecellen van silicium, die een rendement van een kleine twintig procent halen, lijkt dat nog maar kinderspel. Maar als de kosten voor productie en plaatsing verlaagd kunnen worden met een factor tien, dan wordt het een heel ander verhaal.

In de laboratoria van Shell in Amsterdam zijn onderzoekers eveneens op zoek naar mogelijkheden om, zoals zij het noemen, *ultra lowcost photovoltaic cells* te maken. Het achterliggende idee is dat zonnecellen, willen ze werkelijk kunnen concurreren met olie en gas, in bulk geproduceerd moeten worden. Ze moeten bij wijze van spreken op tentdoek kunnen worden gedrukt of – net als graffiti – met een spuitbus op muren en andere vlakken kunnen worden aangebracht. Om dat voor elkaar te krijgen moet duidelijk zijn wat er precies gebeurt in de Grätzelcel en varianten daarvan. Anders gezegd, het moet duidelijk zijn hoe het moleculaire naaimachientje werkt dat zorgt voor de overdracht van elektronen en het vullen van de ‘gaten’ in de nanoscopische poriën van de cel. Nanotechnologie is daarbij onmisbaar. Voor de chemie die nodig is om de cellen te maken is bovendien kennis nodig van oplossingen en suspensies, natte nanotechnologie eigenlijk, beter bekend als kolloïdchemie.

Fotokatalyse

De elektriciteit uit zonnecellen kan ook worden gebruikt om water te splitsen in waterstof en zuurstof, waarbij de waterstof fungeert als schone energiedrager (zie hieronder). Eleganter is echter om zonlicht rechtstreeks te benutten voor de productie van waterstof. Ruim dertig jaar geleden demonstreerden de Japanse onderzoekers Fujishima en Honda dat foto-elektrolyse of -katalyse in principe mogelijk is. Daarbij gebruikten ze titaandioxide (TiO₂) als positieve pool (anode) in een elektrochemische cel. Zonlicht zorgt ervoor dat er aan die pool elektronen vrijkomen, die vervolgens worden gebruikt om water te splitsen in waterstof en zuurstof. Dat het proces nog niet op grote schaal wordt toegepast heeft te maken met het feit dat er eigenlijk nog geen goed anodemateriaal is ontwikkeld. Titaandioxide is wel stabiel, maar niet erg effectief, omdat er bij de golflengte van zichtbaar licht weinig elektronen loskomen. Andere materialen, die wel reageren op zichtbaar licht zijn vaak niet stabiel genoeg. De groep van Schoonman in Delft doet onderzoek naar de mogelijkheden om de lichtgevoeligheid van nanogestructureerde titaandioxide te verbeteren door de samenstelling van het materiaal te veranderen (doperen). Ook wordt gekeken naar mogelijkheden om titaandioxide te combineren met metaaloxiden en sulfiden die wel gevoelig zijn voor zichtbaar licht. De verwachting is dat het technisch mogelijk zal zijn om waterstof te produceren via fotokatalyse. Of het ook commercieel interessant is, valt nu nog niet te zeggen.

Accu

Een eigenschap van zonne-energie en in het algemeen van stromingsbronnen is dat het aanbod aan elektriciteit sterk fluctueert. Het kan meer of minder hard waaien en door het jaar heen varieert het vermogen van een standaard formaat zonnepaneel (130x65 cm²) van nul (geen elektriciteit) tot 110 watt. Om die fluctuaties in het

aanbod op te kunnen vangen, zou je elektriciteit eigenlijk moeten opslaan. Bijvoorbeeld in accu's. Als het aanbod de vraag overtreft, worden de accu's geladen. In het omgekeerde geval worden ze ingezet om elektriciteit te leveren.

Bestaande accu's zijn niet erg geschikt om in een dergelijke *back up* functie te voorzien. Ze zijn nogal lomp en snel versleten en bevatten bovendien zware metalen en zuren. Moderne accu's zoals nikkelcadmium en lithium zijn minder kwetsbaar, maar wel erg duur. Bovendien kunnen ze niet zo snel worden opgeladen en weer ontladen, hetgeen bij een sterk fluctuerend aanbod van elektriciteit een nadeel is. Nanowetenschap en -technologie bieden uitzicht op een nieuwe generatie goedkope en snelle accu's.

In het Zesde Kaderprogramma van de Europese Unie wordt onderzoek gedaan naar *advanced lithium energy storage systems*, afgekort als ALISTORE. Bij deze verbeterde opslagsystemen wordt gebruik gemaakt van elektroden en elektrolyten die zijn gebaseerd op nanopoeiders en -composieten. De toevoeging van het elementje 'nano' is niet slechts een kreet. De achterliggende gedachte is dat hoe kleiner de deeltjes zijn, des te groter in verhouding hun oppervlakte is. Het oppervlakte-effect dat we al hebben gezien bij de omzetting van aardgas in diesel en van zonlicht in elektriciteit. Maar dat is niet het enige. Juist aan het oppervlak doet zich het fenomeen voor dat hogere oxidatie-toestanden mogelijk zijn. Dat betekent dat aan het oppervlak van bijvoorbeeld mangaan bijna twee keer zoveel elektronen kunnen worden opgeslagen als in de rest van het materiaal. Anders gezegd, hoe kleiner de deeltjes, hoe meer elektriciteit ze kunnen bevatten.

Naast opslag van elektriciteit is ook van belang de snelheid waarmee de accu zich kan opladen en weer ontladen. Die snelheid kan worden verhoogd door de afstand die de lithium-ionen moeten afleggen tussen de kathode en het elektrolyt zo kort mogelijk te maken, zoals het geval is bij het gebruik van nanopoeiders. Nanotechnologie is ook nodig voor het ontwikkelen van alternatieven voor de vloeibare elektrolyten die in de huidige generatie lithium-ion-batterijen worden gebruikt. Daarbij wordt gedacht aan polymeren die van zichzelf niet geleidend zijn, geleidend te maken door ze te voorzien van minuscule kanaaltjes van (half-)geleidende metaaloxiden.

Het uiteindelijke doel is, zoals gezegd, een robuuste accu, die vele honderden keren met hoge snelheid geladen en weer ontladen kan worden en die vele malen meer elektriciteit per volume-eenheid kan opslaan dan de huidige generatie accu's. Om ook buiten de sfeer van notebooks en mobiele telefoon nuttig te zijn, met name in het elektriciteitsnet, zal de accu ook nog eens fors goedkoper moeten zijn.

Waterstof

Een andere mogelijkheid voor het opslaan van elektriciteit is het omzetten ervan in waterstof als het aanbod groter is dan de vraag. In het omgekeerde geval kan de waterstof met behulp van een brandstofcel weer worden omgezet in elektriciteit. Geoffrey Ballard, grondlegger van Ballard Fuel Cells, denkt dat waterstof en elektriciteit zodanig uitwisselbaar worden dat hij er zelfs een nieuw woord voor heeft bedacht: *hydricity*.

Een belangrijke voorwaarde voor het realiseren van die uitwisselbaarheid is de ontwikkeling van goedkope en veilige systemen voor de opslag van waterstof. Dergelijke systemen zijn overigens ook van belang voor auto's die worden aangedreven door een brandstofcel die wordt gevoed met waterstof. Hoe de voorraadvorming van waterstof er uit gaat zien is nog onduidelijk. Het kan in gasvormige toestand, zoals bij de Amsterdamse bussen die op waterstof rijden. Nadeel daarvan is dat de compressie van waterstof energie kost en dat aan de opslag onder hoge druk (200-800 bar) zeer strenge veiligheidseisen gesteld worden.

Een andere optie voor grootschalige opslag is waterstof vloeibaar te maken. Ook hier geldt als nadeel dat het vloeibaar maken van waterstof veel energie kost en daardoor tamelijk kostbaar is. Verder is de temperatuur van vloeibaar waterstof met minus 253 graden Celsius zeer laag, waardoor er hoge eisen aan de warmte-isolatie van de tank gesteld moeten worden. Opwarming van de tank is uiteindelijk onvermijdelijk en door de drukopbouw die hiermee gepaard gaat zal het veiligheidsventiel open gaan waardoor er waterstofgas ontsnapt. Door deze verliezen zal een volle tank vloeibaar waterstof binnen een à twee maanden leeg raken.

De derde optie is de nanotechnologische optie en bestaat uit de opslag van waterstof in de vorm van metaalhydriden, netwerkvormige structuren. Het grote voordeel daarvan is dat je per volume-eenheid meer waterstof kan opslaan dan bij vloeibare waterstof, omdat de waterstofmoleculen dichter op elkaar zitten. Dat het werkt is al aangetoond. Verschillende metalen en legeringen, zoals magnesium, ijzer-titaan en ijzer-lanthaanverbindingen kunnen een veelvoud van hun gewicht aan waterstof opnemen en weer afstaan.

Het probleem is dat metalen die voldoende waterstof opnemen voor toepassing in auto's (meer dan 6,5 gewichtsprocent H₂) dat pas snel genoeg doen bij temperaturen van rond de 350 graden Celsius. Dat is eigenlijk te hoog om de opslag (energetisch) efficiënt te laten zijn. Door deze materialen in nanogestructureerde vorm toe te passen kan de temperatuur al behoorlijk verlaagd worden, naar zo'n driehonderd graden. Verdere verlaging van de temperatuur tot rond de honderd graden is mogelijk door toepassing van nanogestructureerde katalysatoren. Op dit moment is de opslag van waterstof in metaalhydriden nog vooral een kwestie van experimenteren.

Netwerk

Nanotechnologie kan niet alleen een bijdrage leveren aan de ontwikkeling van nieuwe, schonere energiebronnen, maar ook aan de benutting ervan. Beperken we ons tot elektriciteit, dan zien we een duidelijke trend in de richting van een meer fluctuerend aanbod, als gevolg van de inzet van stromingsbronnen en meer decentrale opwekking. Dat laatste blijft niet beperkt tot stromingsbronnen. Ook voorraadbronnen, zoals aardgas en biomassa, worden steeds vaker decentraal omgezet in elektriciteit via (micro-)warmtekrachtcentrales, zoals gasmotoren en brandstofcellen. Naast grootverbruikers, zoals bedrijven, zijn er ook steeds meer kleinverbruikers die zelf in een deel van hun elektriciteitsbehoefte voorzien met zonnepanelen en/of een microwarmtekrachtcentrale.

De combinatie van een fluctuerend aanbod en decentrale opwekking levert nogal wat problemen op voor het klassieke bestaande elektriciteitsnet. Dat is immers gebaseerd

op een zo continu mogelijk aanbod van elektriciteit die bij voorkeur in grote centrales wordt opgewekt. Normaliter worden vraag en aanbod globaal in evenwicht gehouden door van tevoren afspraken te maken tussen de elektriciteitsproducenten over de inzet van productie-eenheden. Naast deze globale afstemming is er een automatische fijnafstemming op basis van de frequentie van de wisselstroom, die normaliter exact vijftig Herz bedraagt.

Bij een wisselend aanbod van elektriciteit uit stromingsbronnen laat een onevenwichtige balans tussen vraag en aanbod zich niet zo gemakkelijk weggelaten. Nu zijn er naar verhouding nog voldoende grote centrales beschikbaar om de fluctuaties op te vangen. Zou het aandeel decentraal vermogen echter verder toenemen, tot circa twintig procent, dan wordt die conventionele back up een kostbare zaak. Als gevolg van de liberalisatie van de elektriciteitsproductie zullen de reguliere producenten niet erg happig zijn om reservevermogen op te stellen als back up voor stromingsbronnen.

Aan de andere kant neemt het aandeel decentraal opgewekte elektriciteit toe. In Jutland in Denemarken bijvoorbeeld bedraagt het centraal opgestelde vermogen al meer dan de helft van het totaal (21 procent windenergie, 31 procent warmtekrachtkoppeling (WKK)). Vandaar dat netbeheerders in Europa zich de laatste jaren bezinnen op de vraag hoe de elektriciteitsvoorziening kan worden gegarandeerd bij decentrale opwekking. Een verandering van paradigma in de elektriciteitswereld, die vergelijkbaar is met het vervangen van de mainframe met zijn tientallen terminals door evenzoveel personal computers die samen een netwerk vormen.

Een dergelijk energie-internet wordt gevormd door zelfstandige eenheden, uiteenlopend van een WKK in de chemische industrie van enkele honderden megawatts tot een huis met vier zonnepanelen op het dak, dat – bij zonnig weer – een halve kilowatt vermogen levert. Voor transport over langere afstanden, bijvoorbeeld tussen Noorwegen en Nederland of in lege gebieden in Europa, wordt gebruik gemaakt van hoogspanning, omdat dat energetisch voordeliger is (hoe hoger de spanning, hoe minder transmissieverlies), maar voor de rest vindt het transport plaats via de midden- en laagspanningsnetten.

Om zo'n energie-internet te realiseren moet het huidige netwerk, dat nog is gebaseerd op eenrichtingsverkeer, worden omgebouwd naar tweerichtingsverkeer. Immers in het energie-internet is elke afnemer in principe ook producent van elektriciteit. Met behulp van elektronische regelsystemen zijn de stromen in een dergelijk net perfect te beheersen. Daarbij gaat het niet alleen om het afstemmen van het aanbod op de vraag, maar ook omgekeerd, om het afstemmen van de vraag op het aanbod. Dat kan betekenen dat bij een onvoorziene toename van de vraag elektrische apparaten in huishoudens, kantoren en bedrijven tijdelijk worden afgeschakeld of gebruik maken van elektriciteit opgewekt door een brandstofcel of opgeslagen in een accu.

Nanotechnologie kan een rol spelen bij de ontwikkeling van een stabiel en intelligent energie-internet, waar het gaat om de ontwikkeling van minuscule sensoren die, gezien de grote aantallen die nodig zijn, ook nog eens erg goedkoop zijn. De sensoren kunnen worden gebruikt in het net zelf om continu parameters in de gaten te houden, zoals spanning en stroomsterkte. Daarnaast zijn elektronische regelaars nodig om huishoudelijke en industriële elektrische apparaten af te schakelen of op minder

vermogen te laten draaien en ze later weer bij te zetten en zo de vraag *real time* af te stemmen op het dan geldende aanbod. Daarmee voorkom je dat de gebruiker meer elektriciteit afneemt dan hij heeft gecontracteerd, zonder dat hij er veel van merkt.

Zoals gezegd maakt een energie-internet het mogelijk om in verhouding veel meer elektriciteit (tot honderd procent) uit stromingsbronnen te halen. Daarmee kunnen we ons een stuk minder afhankelijk maken van fossiele brandstoffen en van politiek instabiele regio's. Een ander voordeel is dat een dergelijk netwerk veel minder gevoelig is voor storingen. Hetzij storingen als gevolg van terroristische aanslagen, hetzij storingen ontstaan door omwaaiende bomen. Een derde voordeel is dat particulieren en bedrijven die zelf elektriciteit opwekken daar waarschijnlijk bewuster en dus zuiniger mee om zullen gaan.

Slot

Uit het voorgaande blijkt dat nanotechnologie van betekenis kan zijn voor de energievoorziening. Zowel door het miniaturiseren van elektronische regelsystemen voor een intelligent energie-internet, als door de ontwikkeling en verbetering van omzettingen, zoals aardgas in diesel en zonlicht in elektriciteit of waterstof. Ook de opslag van elektriciteit in accu's of in waterstof (hydricity) is gebaat bij ontwikkelingen in nanowetenschap en technologie. Daarnaast levert nanotechnologie ook een bijdrage aan het zuiniger omgaan met energie. Bijvoorbeeld door de ontwikkeling van lichtere materialen. Een andere toepassing is de ontwikkeling van LED's (*light emitting diodes*) die nu nog voornamelijk worden gebruikt voor fietslampen, maar die zich op termijn kunnen ontwikkelen tot een zuinig alternatief voor de gloeilamp. Witte LED's produceren momenteel per watt aangevoerde elektriciteit ongeveer drie maal meer licht dan een gloeilamp, maar het verschil wordt groter en kan oplopen tot een factor tien.

De vraag is of de door nanotechnologie gegenereerde opties ook daadwerkelijk gerealiseerd zullen worden. Van belang daarbij is in hoeverre een transitie gehinderd of zelfs onmogelijk gemaakt wordt door bestaande maatschappelijke arrangementen en instituties. De mogelijkheden voor een transitie in de richting van een duurzamere energievoorziening lijken gunstiger dan pakweg tien jaar geleden. Daarvoor zijn globaal drie oorzaken aan te wijzen: de liberalisering van de energievoorziening; de noodzaak om minder of zelfs geheel onafhankelijk te worden van de aanvoer van olie uit politiek instabiele regio's en het maatschappelijk verzet tegen milieuvervuiling.

Om te beginnen de liberalisering. Deze maakt het mogelijk dat nieuwe toetreders met nieuwe producten, processen en diensten de markt kunnen betreden en daarmee ook de bestaande producenten dwingen tot technologische vernieuwing. Diezelfde liberalisering dwingt ook tot nieuwe arrangementen, bijvoorbeeld ten aanzien van de elektriciteitsdistributie. Het genoemde energie-internet kan het bestaande patroon van één producent met vele afnemers doorbreken en vervangen door een patroon met vele producenten en vele afnemers.

De technische belemmeringen voor het realiseren van het energie-internet lijken mede dankzij nanotechnologie overkomelijk, terwijl het maatschappelijk gezien ook voordeel oplevert in de vorm van verminderde kwetsbaarheid voor terroristen of omvallende bomen. Van meer psychologische aard is het gevoel minder afhankelijk te

zijn van een anonieme elektriciteitsproducent; *empowerment* in de letterlijke zin van het woord.

De tweede oorzaak is de vrij algemeen gevoelde behoefte om de afhankelijkheid van de olielanden te verminderen. Dat lijkt een belangrijke drijfveer voor de ontwikkeling alternatieve bronnen als biobrandstoffen en stromingsbronnen, met name zonne-energie. De groei van 'klassieke' zonnecellen wordt gemeten in dubbele cijfers, maar desondanks is het aandeel zonne-energie in het totaal van de energievoorziening nog erg bescheiden, mede door de hoge kosten per kilowattuur. Nanotechnologie kan een bijdrage leveren aan het drastisch verlagen van die kosten door de ontwikkeling van goedkopere zonnecellen die gemakkelijker zijn te installeren. Dat is niet alleen interessant voor industrielanden, maar vooral ook voor ontwikkelingslanden, waar hele gebieden niet zijn aangesloten op het elektriciteitsnet en dat voorlopig ook niet zullen worden.

Een derde oorzaak voor een transitie in de richting van een duurzamere energievoorziening is het tegengaan van milieuvervuiling. Vanaf januari 2005 wordt in de Europese Unie een prijs gezet op elke ton teveel uitgestoten CO₂. Evenals indertijd de (Nederlandse) zuiveringsheffing kan ook deze heffing een stimulans zijn voor de ontwikkeling van nieuwe technologie, waaronder nanotechnologie, voor schone conversieprocessen. Behalve om de uitstoot van CO₂ te verminderen, is de ontwikkeling van dergelijke technieken van belang om de lokale milieuvervuiling tegen te gaan. Met name in opkomende industrielanden als China en India groeit het verzet tegen de smog waarmee de ontwikkeling van de welvaart aldaar gepaard gaat. Het groeiende milieubewustzijn in die landen kan een belangrijke prikkel zijn voor schone conversietechnieken, die mede gebaseerd zijn op nanotechnologie.

Al met al lijkt nanotechnologie een belangrijke bijdrage te kunnen leveren aan de overgang naar een meer duurzame energievoorziening. Op een aantal terreinen, onder meer bij het ontwikkelen van schone conversieprocessen, goedkope zonnecellen en opslag van elektriciteit en waterstof, kan nanotechnologie zelfs voor doorbraken zorgen. Op andere terreinen, zoals de ontwikkeling van brandstofcellen, leidt nanotechnologie tot stapsgewijze verbeteringen.

Doorbraken noch stapsgewijze verbeteringen komen echter vanzelf tot stand. Er zijn weliswaar stevige maatschappelijke drijfveren voor de ontwikkeling in de richting van een duurzamere energievoorziening, maar daar staat tegenover dat energievoorziening een complexe zaak is. Het gaat niet alleen om technologie en infrastructuur, maar ook om ingewikkelde maatschappelijke arrangementen. Om die reden lijkt het zinvol om maatschappelijke proeftuinen te creëren, waarin naar hartelust geëxperimenteerd kan worden met duurzame vormen van energievoorziening.

Contactpersonen

Prof.dr. ir. Krijn de Jong, Anorganische Chemie en Katalyse, Universiteit Utrecht
Dr. Erik Kelder, Laboratorium voor Anorganische Chemie, TU Delft
Dr.ir. Ton Kipperman, Kipperman Consultancy and Mediation, Rosmalen
Dr.ir. Roel van de Krol, Laboratorium voor Anorganische Chemie, TU Delft
Dr. Herman Kuipers, Exploratieve Research, Shell Amsterdam
Dr. Rolf Künneke, Programma Energie van Infrastructuur, TU Delft
Dr.ir. Harro van Lente, vakgroep Innovatiemanagement, Universiteit Utrecht
Prof. dr. Joop Schoonman, Laboratorium voor Anorganische Chemie, TU Delft
Dr. Jeroen van der Sluijs, Wetenschap, Technologie en Samenleving, Universiteit Utrecht
Ir. Jan Paul van Soest, Advies voor Duurzaamheid, Pijnacker

Literatuur/websites

- Gillett S.L. *Nanotechnology: clean energy and resources for the future*, Foresight Institute 2002 (www.foresight.org).
- Geibler J. von et al *Will nanotechnology contribute to sustainable development?* Wuppertal Institute (www.wupperinst.org).
- Hollister, Paul, *Nanotech, the tiny revolution*, CMP Scientifica 2002.
- Jeeninga H. et al *Transitie naar een duurzame energievoorziening in 2050, evolutie of revolutie?* ECN Beleidsstudies, Petten 2002 (www.ecn.nl/library/reports).
- Kipperman A. *Contouren energietransitie*, Rosmalen 2003 via a.kipperman@planet.nl.
- 'Network Modernization: the impact of telecom and energy reform on investments and innovations in networks', Symposium TU Delft, 27-28 mei 2004.
- Rehtanz C. 'Power grid control', in: *10 Emerging technologies that will change our world. Technology Review February 2004*, www.technologyreview.com.
- Reijnen, L. *Gas-phase synthesis of sulphide absorbers for thin film and nanostructured solar cells*, Proefschrift TU Delft, 2003.
- Sawin J. *Mainstreaming renewable energy in the 21st century*, Worldwatch Institute, Washington, 2004 (www.worldwatch.org).
- Vaitheeswaran Vijay V., *Power to the People*, Farrar, Strauss and Giroux, New York 2003.
- Wilson, R. 'Power grid could benefit from nanotech, Stanford symposium says', in: *EE Times* september 2003 (www.techweb.com/wire/story).
- Wit P. de 'De derde generatie zonnecel uitrollen', in: Shell Venster maart/april 2004.
- Zeilmaker R. 'Een koud biertje van het zonnecelstrandmatje', in: Delta, Delft 22-04-04